نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۸، ص ۲۲۰-۲۰۹

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 1, Spring - Summer 2019, p. 209-220

ساخت و ارزیابی یک اجاق زیست‌توده‌ای سیار برای استفاده در مناطق دور از شبکه توزیع گاز طبیعی

محمدعلی ابراهیمی‌نیک[1*] - عباس روحانی[1]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۱

چکیده

پخت و پز در روستاها و عشایر محروم معمولاً با روش سنتی سوزاندن هیزم صورت می‌گیرد که همراه با انتشار دود، ذرات معلق و منوکسیدکربن است. قرارگرفتن در معرض این آلاینده‌ها می‌تواند منجر به دامنه وسیعی از بیماری‌ها شود. هدف مطالعه حاضر، ساخت، ارزیابی یک اجاق زیست‌توده‌سوز مناسب برای جایگزینی با روش سنتی در مناطق محروم می‌باشد. در این پژوهش، یک اجاق زیست‌توده‌ای سیار طراحی و ساخته شد. ارزیابی کارایی اجاق با آزمون استاندارد جوشاندن آب با استفاده ضایعات خرده چوب، پوست بادام و چوب ذرت صورت گرفت. میزان منوکسیدکربن منتشرشده از اجاق در سه حالت آشپزی در فضای باز، در آشپزخانه بدون هواکش و در آشپزخانه زیر هواکش معمولی اندازه‌گیری و با آتش معمولی در فضای باز مقایسه شد. مشاهدات نشان داد که شعله حاصله از تمامی سوخت‌ها به‌جز در مرحله پایانی (اتمام سوخت) بدون دود و ذرات معلق بود. رنگ شعله زرد و بخشی از آن آبی بود. طولانی‌ترین زمان شعله‌دهی مربوط به پوست بادام (۳۵۰ گرم) با زمان ۵۱ دقیقه بود. میانگین منوکسیدکربن منتشر شده در ناحیه تنفس کاربر ۴/۷، ۷/۵، ۵/۲ و ۴۳۰ ppm به‌ترتیب برای آشپزی با اجاق در فضای باز، در فضای بسته بدون هواکش، در فضای بسته با هواکش و آتش معمولی به‌دست آمد. میزان منوکسیدکربن منتشر شده به محیط در محدوده استاندارد بوده و بنابراین این اجاق نسبت به روش سنتی مرسوم، بسیار پاک‌تر و کاراتر بوده و می‌تواند به‌منظور پیشگیری از امراض ریوی ناشی از استنشاق دود در زمان پخت‌وپز، در مناطق فاقد گاز طبیعی ترویج گردد.

واژه‌های کلیدی: اجاق، بازده حرارتی، پیرولیز، ضایعات کشاورزی

مقدمه

در حال حاضر ۴۰ درصد از جمعیت جهان تمام یا بخشی از انرژی مورد نیاز روزانه خود را از محل احتراق زیست‌توده جامد (مانند چوب) فراهم می‌کنند (Bonjour *et al*., 2013). بخش زیادی از این جمعیت به‌صورت سنتی و با احتراق چوب گرمایش لازم برای پخت‌وپز خود را تأمین می‌کنند. سوزاندن چوب و یا هر زیست‌توده دیگری در اجاق‌های عادی و مرسوم غالباً همراه با احتراق ناقص است. ثابت شده است که انتشار منوکسیدکربن و ذرات معلق باعث بروز عفونت‌های حاد تنفسی و انسداد مزمن ریوی در زنان خانه‌دار می‌گردد (Bonjour *et al*., 2013; Halder *et al*., 2014; Singh *et al*., 2014). تجمع منوکسیدکربن پتانسیل بالایی از خطر را برای افراد در معرض آن در محیط‌های بدون تهویه ایجاد می‌کند (Ashrafi *et al*., 2016). علت سمی بودن این گاز، میل ترکیبی بسیار بالای آن برای ترکیب با هموگلوبین خون است (Chaloulakou *et al*., 2002). با توجه به محدودیت‌های مالی و دوری بسیاری از مناطق روستایی از شبکه‌های تأمین و توزیع سوخت‌های مایع و گاز طبیعی، سال‌های زیادی طول خواهد کشید تا بتوان این روش‌های پخت‌وپز را با اجاق‌های گازسوز یا نفت‌سوز جایگزین نمود. بنابراین در سال‌های اخیر شمار تحقیقات روی افزایش بازدهی و کاهش آلایندگی اجاق‌های با سوخت جامد (زیست‌توده) زیاد شده و نمونه‌های بهبودیافته فراوانی معرفی شده است.

مطالعات فراوانی روی میزان انتشار منوکسیدکربن از اجاق‌های چوب‌سوز منتشر شده است که در غالب آنها، سعی بر معرفی، ارزیابی و ترویج نوع خاصی از اجاق متناسب با شرایط اجتماعی جامعه هدف و سوخت در دسترس آن جامعه بوده است که از آن جمله می‌توان به (Johnson *et al*., 2008) در روستاهای مکزیک، (Dutta *et al*., 2007; Panwar *et al*., 2013; Singh *et al*., 2014) در روستاهای هند، (Fan *et al*., 2015; Shen, 2016) در چین، (Xiao *et al*., 2015) در تبت، (Adkins *et al*., 2010; Hankey *et al*., 2015)

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد و عضو مرکز پژوهشی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: ebrahimi-nik@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v9i1.66670

در افریقـــا، (O'Shaughnessy *et al*., 2014) در مـــالاوی، (Febriansyah *et al*., 2014; Halder *et al*., 2014) در بنگلادش و اندوزی، (Phusrimuang and Wongwuttanasatian, 2016) در تایلند و (Commodore *et al*., 2013) در مورد پرو اشاره نمود.

اساس غالب اجاق‌های معرفی شده، فرآیند گازیفیکاسیون است (Sutar *et al*., 2015b). در این فرآیند، کربن موجود در زیست‌تـوده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر با بخار آب، دی‌اکسیدکربن یا مخلوطی از آن دو واکنش داده و به گازی قابل احتراق (عمدتاً شـامل CO و H_2) تبدیل می‌شوند. برخلاف احتراق که همیشـه سـعی در آن است که هوای اضافه بـه سیسـتم دمیـده شـود تـا از احتـراق کامـل اطمینان حاصل شـود، در گازیفیکاسـیون، هـوا بـه‌صـورت محـدود و به‌اندازه حدوداً ۳۵ درصد هوای استوکیومتری در اختیار زیست‌توده قرار مـی‌گیـرد (Basu, 2010). در حقیقـت در ایـن فنـاوری، بخشـی از زیست‌توده محترق شده تا گرمای لازم برای پیرولیز باقی زیست‌تـوده فراهم آورد. با پیرولیز، بخش فرار زیسـت‌تـوده[1] بـه‌صـورت ترکیبـات قیری مانند از آن جدا شده و وارد فاز گاز می‌گردد. این گاز که بخارات پیرولیزی نامیده می‌شود و شامل ترکیبات زنجیره بلند کربنی است، بـا گذر از منطقه داغ‌تر (دمای بین ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سـانتی‌گـراد) بـه منوکسیدکربن و هیدروژن شکسته مـی‌شـود. همچنـین، هیـدروژن و منوکسیدکربن بیشتری با عبـور بخـار آب و دی‌اکسـیدکربن از سـطح زغال داغ (فرآیند کاهش) تولید می‌شود. بنابراین در انتهای فرآینـد، در حالت ایده‌آل، بخش فرار زیست‌توده به گازی شامل منوکسـیدکربن و هیدروژن تبدیل می‌گردد که به لحاظ ارزش سوختی مناسب (۵ تا ۱۵ $Mj\ N^{-1}m^{-3}$) و به‌لحاظ کیفیت سوختن بسیار پاک است.

در سال‌های اخیر انواع بسیار گوناگونی از این اجـاق‌هـا سـاخته و مورد ارزیابی قرارگرفته‌اند. این اجاق‌ها به دو نوع کلی جریان طبیعی و جریان اجباری (استفاده از فن) تقسیم‌بندی می‌شوند. نـوع اول مزیـت عدم نیاز به منبع نیرو را دارد درحالی‌که در نـوع دوم، شـروع بـه کـار اجاق ساده‌تر بوده و همچنین امکان کنتـرل شـعله وجـود دارد. بـازده حرارتی یک اجاق به طراحی و نوع سوخت مورد استفاده بسـتگی دارد و از ۸ درصد (Tryner *et al*., 2014) تا ۵۰ درصـد (Mukunda *et al*., 2010; Reeda *et al*., 2000; Sutar *et al*., 2015b) گـزارش شده است.

متاسفانه در ایران نه‌تنها تحقیقاتی در این زمینه صـورت نگرفتـه است بلکه آشنایی با این فناوری هم در سطح بسیار پایینی است. ایـن در حـالی اسـت کـه در بسـیاری از منـاطق ایـران ماننـد روسـتاهای دورافتاده، مناطق عشایرنشین و حتی حاشیه شهرهای کوچک، هنوز از چوب و یا سایر منابع زیست‌توده جامد به‌عنوان سوخت برای پخت‌وپز استفاده می‌شود. علاوه بر مخاطرات سلامتی که در بالا بـه آن اشـاره گردید، بازدهی بسیار پایین اجاق‌های مرسوم ساده، مصرف زیست‌توده خانوار را بالا می‌برد که خود می‌تواند تهدیدی بـرای منـابع طبیعـی و عامل تخریب جنگل و یـا بیابـان‌زایـی گـردد. همچنـین در برخـی از مناطق کشـور، بـا توجـه بـه محصـولات رایـج آن منطقـه، ضـایعات کشاورزی زیادی تولید می‌گردد که اگر از آن‌هـا بـه روش‌هـای نـوین بـرای تولیـد انـرژی اسـتفاده گـردد مـی‌توانـد جـایگزین بخشـی از سوخت‌های فسیلی ماننـد کپسـول‌هـای LPG و نفـت سـفید شـود (Ostad-Hosseini *et al*., 2015).

در این مطالعه، یک اجاق زیسـت‌تـوده‌ای مکـش طبیعـی (بـدون کاربرد فن و درنتیجه بدون نیاز به برق) با اقتباس از طرح‌های معرفی شده در سطح جهان با هدف استفاده در مناطق دور از شبکه توزیع گاز طبیعی ساخته شد. اساس اجاق بر سادگی، ارزانی و قابلیت ترویج بـالا است. کارایی این اجاق با استفاده از سه نوع از ضایعات مرسوم شـامل پوست بادام، خرده‌چوب و چوب بلال مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

ساخت و راه‌اندازی اجاق

در این مطالعه اجاقی از نوع بالاسو[2] با مکش طبیعی با اقتبـاس از طرح کلی everything nice stove که توسـط (Anderson *et al*., 2007) پیشنهاد شده است ساخته شد. طرح‌واره اجـاق در شـکل ۱ و مشخصات هندسی آن در جدول ۱ آورده شـده اسـت. جـنس هـر دو استوانه داخلی و خارجی از ورق گالوانیزه بود. این دو استوانه از بالا هم سطح هستند و درنتیجه، استوانه داخلی کـه کـوچکتر اسـت بـالاتر از استوانه بیرونی قرار می‌گیرد. این فاصله کانالی جهت جریان هوا ایجاد می‌کند. در بالا، فاصله بین استوانه‌ها با ورق گالوانیزه بسته شده است. در هر آزمایش اجاق تا سه چهارم حجم آن از زیست‌توده پر مـی‌شـد. سپس مقدار کمی اتانول روی سطح آن اسپری می‌شد و بعد از آن بـا کمک کبریت مشتعل می‌شد. این عمل علاوه بر تسریع آغاز احتـراق، پیشروی یکنواخت نوار احتراق به سمت پـایین را تضـمین مـی‌کـرد. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد.

سوخت

پوست بادام با لیگنین و چگالی بـالا نماینـده انـواع پوسـت‌هـای خشکبار انتخاب شد. خرده چوب، حاصل شاخه‌های کوچـک و بـزرگ انواع درختان، به‌عنوان فراوان‌ترین سوخت زیست‌توده‌ای و چوب بلال نیز به‌عنوان یک سوخت با بافت متخلخل و چگالی پایین برای آزمون اجاق مورد استفاده قرار گرفت.

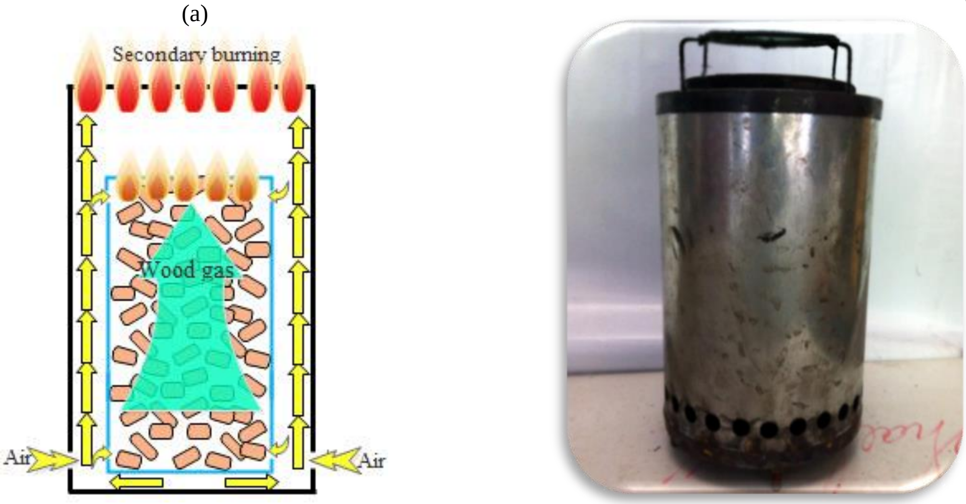
به‌منظور هرچه نزدیک‌تر بودن به شرایط واقعـی اسـتفاده از ایـن

1- Volatile solid

2- Updraft

اجاق‌ها، پوست بادام شکسته شده بدون هیچ‌گونه تغییری مورد استفاده قرار گرفت. اما چوب بلال با توجه به آزمایش‌های اولیه مشخص شد که باید خرد شود. این نکته قابل ذکر است که به تجربه مشخص شد که می‌توان اجاق را با سوخت با اندازه ذرات کوچک راه‌اندازی نمود و پس از گذشت چند دقیقه، با بالا رفتن دمای داخل محفظه اجاق، می‌توان سوخت با ابعاد بزرگتر را اضافه نمود بدون اینکه خللی در عملکرد اجاق ایجاد شود. مشخصات مواد مورد آزمایش در جدول ۲ آمده است.

(b) (a)



شکل ۱– اجاق زیستی ساخته شده (b)؛ طرحواره فرآیند کاری اجاق (a)

Fig. 1. The manufactured stove (b): and the schematic of the process (a)

جدول ۱– ابعاد هندسی اجاق ساخته شده (میلی‌متر)

Table 1- Geometrical features of the manufactured stove (mm)

قطعه اصلی **Main part**	ارتفاع **Height**	قطر **Diameter**	قطر سوراخ‌های هوا **Diameter of air holes**	فاصله بین سوراخ‌های هوا **The gap between air holes**
استوانه خارجی Outer cylinder	305	200	15	10
استوانه داخلی Inner cylinder	225	150	8 5	10 3

جدول ۲– ویژگی‌های سه نوع سوخت استفاده شده

Table 2- Characteristics of the three types of fuels

نوع سوخت **Fuel type**	ارزش حرارتی خالص **Net heat value ($MJ.kg^{-1}$)**	متوسط اندازه ذرات **Average particle size (mm)**	درصد رطوبت **Moisture content (%)**	وزن اولیه **Initial weight (g)**
خرده چوب Wood chips	18.5*	5	7	210
چوب ذرت Corn sticks	17*	7	15	250
پوست بادام Almond shell	17.49*	9	5	350

* (ECN, 2015)

ارزیابی فنی اجاق

از آزمون جوشاندن آب[1] برای تعیین کارایی اجاق در هر یک از سوخت‌های به‌کار رفته استفاده شد (Bailis *et al*., 2007). این آزمون در حقیقت شبیه‌سازی روند پخت است. این استاندارد توسط پیمان جهانی برای اجاق‌های پاک[2] توسعه یافته است. تغییرات دمای آب با گذشت زمان به کمک دماسنج جیوه‌ای و کرنومتر تعیین گردید. آزمایش‌ها در مشهد در ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. در شروع سرد، اجاق با محیط هم‌دما بود و در تمامی آزمایش‌ها دمای یک لیتر آب از ۱۸/۵۰ درجه سانتی‌گراد به نقطه جوش ۹۶ درجه سانتی‌گراد رسانده شد.

ارزیابی عملکرد اجاق

بازده اجاق بر مبنای میزان گرمای انتقال داده شده به آب طبق رابطه (۱) محاسبه گردید (Bailis *et al*., 2007).

$$\eta = \frac{c_w m_w (T_{eb} - T_{env})}{m_b LHV_b - m_c LHV_c} \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن، C_w گرمای ویژه آب (۴/۲ $kJ.kg^{-1}.K$)، m_w جرم آب، T_{eb}-T_{env} اختلاف دمای جوش و دمای اولیه آب (K)، m_b جرم زیست‌توده تغذیه شده به اجاق (kg)، LHV_b ارزش حرارتی خالص زیست‌توده ($Mj\ kg^{-1}$)، m_c جرم زغال به‌جا مانده (kg)، LHV_c ارزش حرارتی زغال. توان حرارتی اجاق طبق رابطه (۲) محاسبه گردید (Bailis *et al*., 2007).

$$P = \frac{m_b LHV_b - m_c LHV_c}{TD_s} \qquad (۲)$$

که در آن، TDs زمان کل آزمایش به ثانیه و P توان حرارتی اجاق به وات است.

میزان انتشار منوکسیدکربن

آلایندگی اجاق از لحاظ میزان انتشار منوکسیدکربن در سه حالت آشپزی مورد بررسی قرار گرفت؛ ۱) آشپزی در فضای باز، ۲) آشپزی در اتاق (آشپزخانه) بدون هواکش، ۳) آشپزی در آشپزخانه زیر هواکش معمولی. این هواکش با توجه به جامعه مورد نظر، ساده و ارزان و بدون کاربرد فن ساخته شد. میزان انتشار منوکسیدکربن برحسب ppm با سنجشگر CO110 مارک STANDARD ساخت کشور تایوان هر ۱۵ ثانیه یک بار ثبت شد. حسگر در ارتفاع ۷۰ سانتی‌متری و به فاصله ۵۰ سانتی‌متر از اجاق قرار داده شد. اندازه‌گیری‌ها در یک اتاق با مشخصات شکل ۲ صورت گرفت. در حین آزمایش درب اتاق (به سمت داخل) کاملاً باز و پنجره‌ها (رو به محیط بیرون) نیمه‌باز بود. در مورد احتراق در فضای باز، به منظور لحاظ کردن اثر باد، میزان منوکسیدکربن با توجه به جهت وزش باد غالب، قبل و بعد از آتش اندازه گیری شد (شکل ۲). تمامی آزمایشات در سه تکرار انجام شد و با توجه به اینکه سوخت غالب در اجاق‌های سنتی چوب است، تنها در مورد این سوخت آزمایش انتشار منوکسیدکربن اجرا گردید.

نتایج و بحث

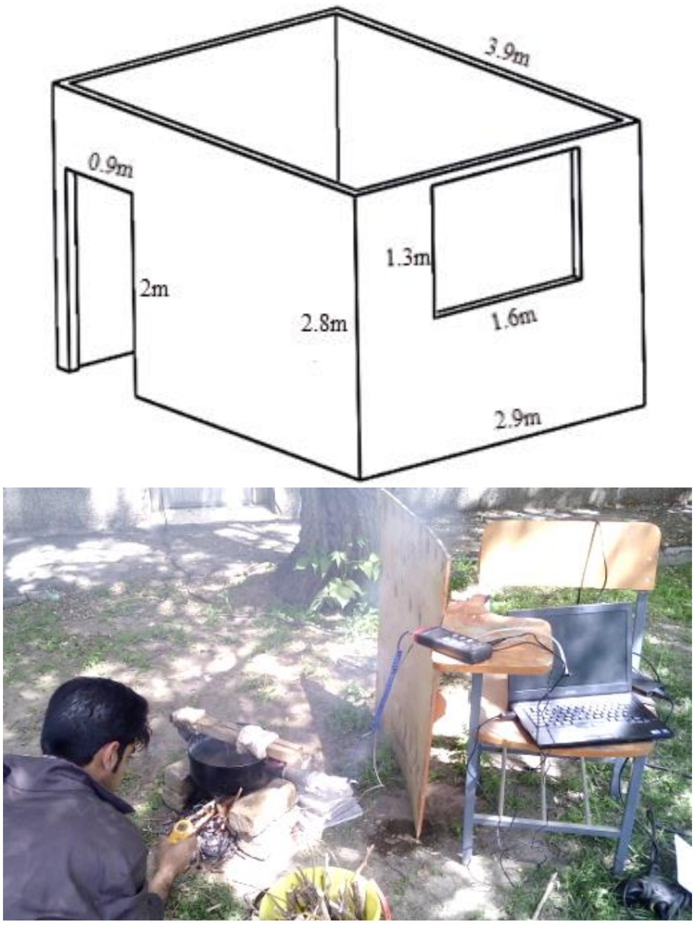
عملکرد کلی اجاق

عملکرد کلی هر اجاق خوراک‌پزی با چهار فاکتور سنجیده می‌شود که عبارتند از: سهولت تغذیه سوخت، کیفیت شعله، بازدهی حرارتی و توان آن (Kshirsagar Kalamkar, 2014). در مورد اجاق ساخته شده در این پژوهش، خوراک‌دهی به‌سادگی با برداشتن درب بالایی آن قابل انجام است. شعله ایجاد شده هم نسبتاً تمیز و بدون دود است. رنگ آن نارنجی و در برخی نقاط آبی بود. با آزمایش‌ها در فضای بسته، هیچ احساس تنگی نفس و یا سوزش چشم در مدت ۴۰ دقیقه مجاورت در کنار اجاق پیش نیامد. درحالی‌که آتش زدن هرکدام از مواد چوبی به‌صورت سنتی (اجاق سه دیواره‌ای) همراه با دود غلیظ فراوان و تبعات ناشی از آن است. برای تعیین دو فاکتور دیگر ارزیابی اجاق، از آزمایش استاندارد جوشش آب استفاده شد که نتایج آن در ادامه آمده است.

ارزیابی اجاق در شروع سرد

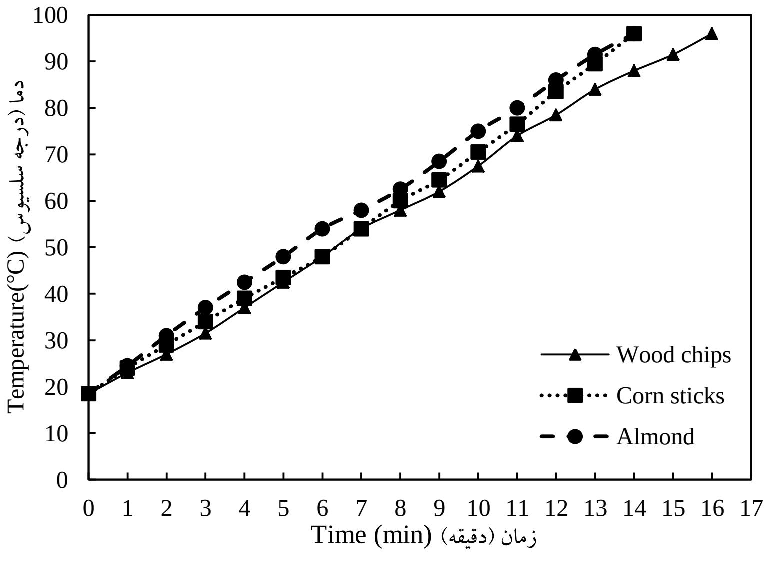
هدف از ارزیابی در شروع سرد، بررسی قابلیت اجاق در مرحله راه‌اندازی اولیه است. در این مرحله دمای بدنه اجاق معادل دمای محیط است. ارزیابی اجاق در شروع سرد بر حسب روند تغییرات دمای آب ظرف به‌ازای هر دقیقه برای سه نوع سوخت خرده چوب، چوب ذرت و پوست بادام در شکل ۳ نشان داده شده است. متوسط زمان طی شده برای رسیدن آب به دمای جوش ۱۵ دقیقه به‌دست آمد. به‌منظور دست یافتن به درک بهتر از شرایط عملکردی این اجاق، آزمایشی در شرایط مشابه اما با استفاده از اجاق با گاز مایع (کپسول پیک‌نیک) (به‌عنوان اجاقی رایج به همان ابعاد، اما با سوخت فسیلی) صورت گرفت. زمان لازم برای به‌جوش آمدن یک لیتر آب در صورتی‌که میزان شعله متوسط باشد ۱۳ دقیقه و با شعله بالا، ۹ دقیقه به‌دست آمد.

1-Water boiling test (WBT)
2- Global alliance for clean cook stoves



شکل ۲- هندسه اتاق آزمون تعیین میزان انتشار CO (بالا)، آزمایش در فضای باز (پایین)

Fig. 2. The geometry of the CO emission test room (up), outdoor test (down)



شکل ۳- روند تغییرات دمای آب در مرحله سرد برای سوخت‌های خرده چوب، چوب ذرت و پوست بادام

Fig. 3. Water temperature changes at the cold stage for fuels include wood chips, corn sticks and almond shell

میزان زمان طی شده تا رسیدن آب به دمای جوش همراه با معادله افزایشی دما برای سه نوع سوخت در جدول ۳ آورده است. یافته‌ها نشان دادند که روند تغییرات دمای آب برای هر سه نوع سوخت خطی با ضریب تبیین ۹۹درصد می‌باشد. شیب تقریبی ۵ بدان مفهوم است که به‌ازای هر یک دقیقه، ۵ درجه به دمای آب اضافه می‌شود. یکنواختی شعله و زمان رسیدن دمای آب به دمای جوش نشان‌دهنده رضایت‌بخش بودن عملکرد اجاق در فاز سرد می‌باشد.

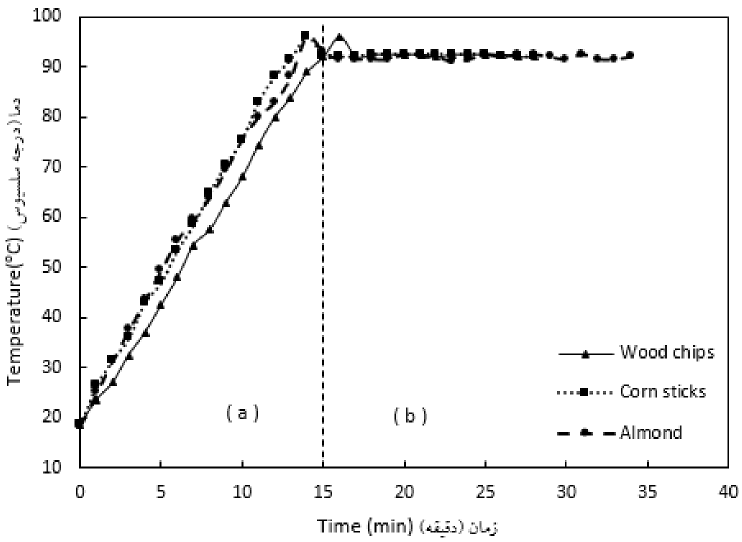
جدول ۳- معادله روند تغییرات دمای آب و همچنین مدت زمان طی شده تا جوشیدن آب در شروع سرد (دمای اولیه ۱۸/۵ و دمای جوش ۹۶ درجه سانتی‌گراد)

Table 3- Equation of the process of variation in water temperature vs. time to boil the water in the cold stage (Initial temperature 18.5 °**C**, boiling temperature 96 °C)

نوع سوخت **Fuel type**	مدت طی شده تا جوش آب (دقیقه) **Time to boil water (min)**	معادله افزایشی دما **Incremental temperature equation**
خرده چوب Wood chips	16	$T = 4.99\ t + 17.80\ ,\ R^2 = 0.99$
چوب ذرت Corn sticks	14	$T = 5.45\ t + 17.20\ ,\ R^2 = 0.99$
پوست بادام Almond shell	14	$T = 5.49\ t + 19.73\ ,\ R^2 = 0.99$

ارزیابی اجاق در شروع گرم و نیم‌جوش

هدف از این مرحله، بررسی چگونگی افزایش دمای آب تا دمای جوش و نیز نگه داشتن دمای آب در حالت نیمه‌جوش می‌باشد. شکل ۴ روند تغییرات دمای آب تا زمان اتمام سوخت را نشان می‌دهد. شروع گرم دارای دو فاز جوش و نیمه‌جوش می‌باشد. فاز جوش (a) در مرحله گرم مشابه شروع سرد می‌باشد. مدت زمان طی شده تا رسیدن به دمای جوش آب در شروع گرم کاملاً مشابه شروع سرد است (جدول ۱ و ۲) درحالی‌که در بسیاری از مطالعات این زمان کمتر است (Kshirsagar and Kalamkar, 2014; Ochieng *et al.*, 2013). در حقیقت این بخش از آزمایش نشان‌دهنده تاثیر دمای بدنه اجاق بر تغییرات فرآیند است. در برخی از اجاق‌ها به‌دلیل جنس و نوع طراحی، در زمانی‌که هنوز بدنه سرد است، شعله‌دهی با دود همراه است و حرارت منتقل شده به آب در واحد زمان هم به تناسب آن کمتر است اما در اجاق حاضر با توجه به استفاده از ورق آهنی نازک (۰/۳ میلی‌متری) انتقال حرارت سریع بوده است که بدین معنی است که دمای بدنه به سرعت به حد نهایی خود رسیده است.



شکل ٤- روند تغییرات دمای آب در شروع گرم برای سوخت‌های خرده چوب، چوب ذرت و پوست بادام

Fig. 4. Water temperature changes at the hot stage for fuels include wood chips, corn sticks and almond shell

فاز دوم شروع گرم (فاز نیمه‌جوش) از ابتدای جوش آب تا زمانی‌که سوخت به اتمام برسد طول می‌کشد. این مدت از آن جهت اهمیت دارد که حجم مشخصی از سوخت چه مدت می‌تواند گرمای مشخصی فراهم کند. از جنبه دیگر، اهمیت آن در پخت و پز واقعی است، زمانی‌که باید آب به‌جوش آید و از آن پس به‌حالت نیمه‌جوش بماند تا آنکه غذا طبخ شود. مدت زمان‌های فاز نیمه‌جوش برای سه نوع سوخت در جدول ۳ نشان داده شده است. طول مدت فاز نیمه‌جوش به‌ترتیب صعودی متعلق است به سوخت‌های خرده چوب، چوب ذرت و پوست بادام. طول مدت شعله‌دهی به دو عامل ساختار لیگنوسلولزی زیست‌توده و مقدار آن بستگی دارد. با توجه به چگالی بیشتر پوست بادام، در یک حجم مشخص، مقدار بیشتری سوخت در اجاق قابل بارگیری است (جدول ۴). از طرف دیگر، میزان لیگنین پوست بادام بیشتر از دو سوخت دیگر است و به تبع آن تجزیه کندتر و در نتیجه آزادشدن بخارات پیرولیزی با سرعت کمتری صورت می‌گیرد. می‌توان گفت که به‌همین دلایل طول مدت شعله‌دهی در سوخت بادام بیشتر از دو سوخت دیگر است.

جدول ٤- رابطه روند تغییراتی دمای آب در شروع گرم

Table 4- Relationship of the variation of water temperature at the hot start phase

نوع سوخت Fuel type	مرحله Stage	طول مرحله (دقیقه) During phase (min)	Equation
خرده چوب Wood chips	جوش Boiling	16	$T = 5.01\ t + 17.98,\ R^2 = 0.99$
	نیمه‌جوش Semi- boiling	11	-
چوب ذرت Corn sticks	جوش Boiling	14	$T = 5.56\ t + 19.95,\ R^2 = 0.99$
	نیمه‌جوش Semi- boiling	13	-
پوست بادام Almond shell	جوش Boiling	14	$T = 5.33\ t + 21.12,\ R^2 = 0.99$
	نیمه‌جوش Semi- boiling	19	-

ارزیابی عملکرد اجاق

پارامترهای عملکردی اجاق طراحی شده شامل درصد تبدیل، آهنگ تجزیه، بازده و توان اجاق در جدول ۵ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بازده حرارتی در مورد سوخت‌های مختلف اندکی متفاوت است. در گزارشی، بازده حرارتی یک اجاق با استفاده از دو نوع سوخت خرده‌چوب و پوسته نارگیل متفاوت آمده است (Raman *et al.*, 2013) درحالی‌که Tryner و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که نوع سوخت، بر بازدهی تاثیری ندارد و تنها عامل تاثیرگذار بر بازدهی، نوع طراحی اجاق است. ایشان در تغذیه سه نوع اجاق متفاوت با خرده‌چوب و چوب ذرت، به بازدهی ۸ تا ۲۰٪ رسیدند که این تفاوت تنها با تغییر طرح اجاق حاصل شده بود. بازدهی اجاق طراحی شده خود با سوخت پوست برنج ۱۵-۲۰٪ گزارش شده است (Lertsatitthanakorn *et al.*, 2014). همچنین بازده به‌دست آمده توسط آرورا و همکاران در تغذیه با چوب ۲۵٪ بوده است (Arora *et al.*, 2014). محققان دیگری نیز بوده‌اند که بازدهی حرارتی اجاق را بیشتر و تا حد ۳۵ تا ۵۰٪ گزارش کرده‌اند (Mukunda *et al.*, 2010; Reeda *et al.*, 2000; Sutar *et al.*, 2015a).

میانگین بازده حرارتی اجاق در مطالعه حاضر ۴۰/۸ درصد به‌دست آمد که با توجه به موارد اشاره شده در بالا، بازدهی مطلوبی به‌شمار می‌آید. لازم به ذکر است که در محاسبه بازده اجاق، حرارت جذب شده توسط آب برای تبخیر شدن در محاسبات دخیل نشد. بنابراین، بازده حقیقی از مقدار به‌دست آمده اندکی بیشتر است. علت بالا بودن بازده در مطالعه حاضر را می‌توان در طراحی اجاق و ظرف مورد استفاده برای تست آب جوش دانست؛ طراحی اجاق به نحوی است که شعله حاصله یکنواخت و شدت آن نسبتاً کم است. بنابراین، اتلاف حرارتی از طریق بیرون زدن شعله از پیرامون کف ظرف به حداقل خود می‌رسد. تأیید این مطلب توجه به نرخ تجزیه است. میانگین نرخ تجزیه در مطالعه حاضر ۵/۷ گرم در دقیقه است درحالی‌که به‌عنوان مثال در گزارش (Parmigiani *et al.*, 2014) نرخ تجزیه ۱۸ گرم در دقیقه ذکر شده است که این خود شدت بیشتر شعله را نسبت به پژوهش حاضر نشان می‌دهد. برهمین‌اساس، توان نسبتاً پایین اجاق حاضر را می‌توان به‌دلیل شعله آرام، آهنگ تجزیه نسبتاً پایین و بازده بالا دانست.

جدول ۵- عملکرد اجاق شده با سوخت‌های مختلف

Table 5- Performance of the stove with various fuels

نوع سوخت **Fuel type**	توان متوسط (W) **Average power**	بازده (٪) **Efficiency**	آهنگ احتراق ($g.min^{-1}$) **Combustion rate**	درصد تبدیل **Conversion percentage**	وزن بعد از سوختن (g) **Weight after burning**	وزن اولیه (g) **Initial weight**
خرده چوب Wood chips	800	44.2	4.5	74	55	210
چوب ذرت Corn sticks	1000	37.9	5.7	80	50	250
پوست بادام Almond shell	900	40.2	7	70	105	350

میزان انتشار منوکسیدکربن

جدول ۶ میزان انتشار منوکسیدکربن از شروع به‌کار اجاق تا لحظه اتمام سوخت را نشان می‌دهد. به وضوح پیداست که استفاده از جنبه انتشار منوکسیدکربن در هر حالتی بر احتراق معمولی ارجحیت دارد.

جدول ٦- میزان انتشار مونوکسیدکربن از اجاق زیستی در شرایط مختلف (ppm)

Table 6- The amount of carbon monoxide released from the stove at different conditions (ppm)

وضعیت آشپزی Cooking status	میانگین Average	بیشینه Maximum	کمینه Minimum
فضای باز Outdoor	4.7	42	1
آشپزخانه Kitchen	7.5	9	4
آشپزخانه-زیر هواکش Kitchen-under the hood	5.2	7	4
احتراق معمولی Conventional combustion	430	900	6

استفاده از اجاق در فضای باز تحت تاثیر شرایط محیطی بوده است. همان‌طور که از جدول ۳ پیداست، میزان منوکسیدکربنی که کاربر در معرض آن است بسیار متغیر است (اگرچه میانگین آن کم است). این امر به دو دلیل می‌تواند رخ دهد؛ یک اینکه جهت باد گاز حاصل از احتراق را به سمت سنسور منوکسید هدایت کرده و یا از آن دور می‌کند که در نتیجه میزان منوکسیدکربن کمتر یا بیشتر تشخیص داده می‌شود. دلیل دوم می‌تواند ناشی از اخلال فرآیند گازیفیکاسیون بر اثر دمش باد به داخل اجاق باشد.

با توجه به جدول ۳ میزان انتشار منوکسیدکربن بسیار کمتر از احتراق معمولی است. آشپزی در زیر هواکش کمترین میزان انتشار منوکسیدکربن در محل تنفس کاربر را به‌دنبال دارد. طبق استاندارد ملی امریکا در کیفیت هوای اتاق، مدت زمان مجاز قرارگیری در معرض استنشاق گاز منوکسیدکربن ۸ و ۱ ساعت به‌ترتیب برای غلظت‌های ۹ و ۳۵ ppm می‌باشد (Unknown, 2012). براین اساس، استفاده از اجاق طراحی شده در زیر هواکش معمولی هیچ‌گونه خطری را متوجه کاربر نمی‌کند.

در وضعیت آشپزی بدون استفاده از هواکش، متوسط میزان منوکسیدکربن محیط ۷/۵ ppm به‌دست آمد (جدول ۳). این مقدار هم برای مدت زمان آشپزی (یک یا دو مرتبه بارگیری اجاق) نمی‌تواند خطرناک باشد. با این‌حال، بر پایه آزمون‌های متعددی که صورت گرفت، استفاده از اجاق در زیر هواکش گزینه مناسب‌تری است، زیرا در صورتی‌که اندازه ذرات سوخت مورد استفاده خیلی متغیر باشد و یا جریانات هوایی ناگهانی پیش بیاید، احتمال انتشار موقت دود در محیط وجود دارد. اما آشپزی در زیر هواکش، بدلیل جهت دادن به گرمای به‌وجود آمده، حتی در صورت تشکیل دود، فرصت انتشار به محیط را پیدا نکرده و خارج می‌گردد.

نتایج جدول ۳ و همچنین مشاهدات عینی نشان داد که می‌توان از اجاق زیستی در محیط باز هم استفاده نمود. ثبت بیشینه منوکسید کربن ۴۲ ppm در این حالت، لحظه‌ای بوده و حاصل جهت‌دهی باد به شعله و درنتیجه قرارگیری مستقیم سنسور در معرض گازهای حاصل از احتراق می‌باشد. درصورتی‌که در حالت عادی این گازها به سمت بالا حرکت کرده و بلافاصله در محیط باز پخش شده و از غلظت آن کاسته می‌شود.

همان‌طورکه انتظار می‌رود، آشپزی در فضای باز و با احتراق معمولی، کاربر را در معرض آلایندگی بسیار بیشتری قرار می‌دهد. انتشار دود فراوان هم احتمال ابتلا به بیماری‌های تنفسی در درازمدت را بیشتر می‌کند. ضمن اینکه باید این واقعیت را در نظر گرفت که به‌هیچ‌وجه نمی‌توان در فضای مسقف مثل آشپزخانه، از احتراق معمولی برای آشپزی استفاده کرد. غلظت منوکسیدکربن در چنین حالتی می‌تواند به ۲۵۶ ppm نیز برسد (Grabow *et al*., 2013). نتایج حاصل از آزمایش‌ها در حالت آخر (آشپزی به روش سنتی) حاکی از زمان بالای استنشاق دود و منوکسیدکربن توسط کاربر در حین آشپزی می‌باشد. اگرچه میزان کمینه ۶ برای این حالت ثبت گردید اما این مقدار لحظه‌ای و متاثر از جهت وزش باد بوده است. میانگین منوکسیدکربن در این حالت ۴۳۰ ppm به‌دست آمد. متاسفانه آمار دقیقی از جمعیت عشایری و روستایی ایران که هنوز به این روش نیاز روزانه خود را تأمین می‌کنند در دسترس نیست. با این‌حال، مقایسه بازدهی و انتشار منوکسیدکربن در پخت و پز به روش سنتی با روش استفاده از اجاق، مزیت نسبی اجاق را برای استفاده در مناطق دور از شبکه‌های توزیع گاز طبیعی تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

شعله این اجاق در مقایسه با احتراق معمولی دود و مونوکسیدکربن بسیار کمتری دارد و در موارد بسیاری می‌تواند با یک بار بارگیری، زمان و حرارت کافی جهت پختن غذا و گرم نگهداشتن آن را تأمین نماید. همچنین این اجاق قابلیت استفاده از انواع ضایعات (حداقل سه مورد آزمایش شده) را دارد و می‌توان آن را در محیط آشپزخانه به‌کار برد که البته استفاده از هواکش قابل توصیه است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که اجاق زیست‌توده‌سوز، پتانسیل اولیه لازم برای جایگزینی بخشی از نیاز به انرژی جهت پخت‌وپز در مناطق روستایی ایران را دارد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های میدانی انجام شود تا اجاق عملاً در زندگی روزمره برای مدتی به‌کار برده شود تا مطابق با فرهنگ و نیاز جامعه هدف طراحی آن اصلاح گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود پژوهش بر روی اجاق مشابه اما با کاربرد فن مد نظر قرار گیرد.

سپاسگزاری

این مقاله نتیجه طرح مصوب در دانشگاه فردوسی مشهد به شماره ۳۹۴۴۳ می‌باشد که نویسندگان بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی این دانشگاه سپاسگزاری می‌نمایند.

References

1. Adkins, E., E. Tyler, J. Wang, D. Siriri, and V. Modi. 2010. Field testing and survey evaluation of household biomass cookstoves in rural sub-Saharan Africa. Energy for Sustainable Development 14: 172-185.
2. Anderson, P. S., T. B. Reed, and P. W. Wever. 2007. Micro-Gasification: What it is and why it works. Boiling point 53: 35-37.
3. Arora, P., P. Das, S. Jain, and V. V. N. Kishore. 2014. A laboratory based comparative study of Indian biomass cookstove testing protocol and Water Boiling Test. Energy for Sustainable Development 21: 81-88.
4. Bailis, R., D. Ogle, N. MacCarty, D. Still, K. Smith, and R. Edwards. 2007. The water boiling test. USA. p 52.
5. Bonjour, S., H. Adair-Rohani, J. Wolf, N. G. Bruce, S. Mehta, A. Prüss-Ustün, M. Lahiff, E. A. Rehfuess, V. Mishra, and K. R. Smith. 2013. Solid fuel use for household cooking: country and regional estimates for 1980-2010. Environ Health Perspect 121: 784-790.
6. Chaloulakou, A., A. Duci, and N. Spyrellis. 2002. Exposure to carbon monoxide in enclosed multi-level

parking garages in the central Athens urban area. Indoor and Built Environment 11: 191-201.
7. Commodore, A. A., S. M. Hartinger, C. F. Lanata, D. Mäusezahl, A. I. Gil, D. B. Hall, M. Aguilar-Villalobos, and L. P. Naeher. 2013. A pilot study characterizing real time exposures to particulate matter and carbon monoxide from cookstove related woodsmoke in rural Peru. Atmospheric Environment 79: 380-384.
8. Dutta, K., K. N. Shields, R. Edwards, and K. R. Smith. 2007. Impact of improved biomass cookstoves on indoor air quality near Pune, India. Energy for Sustainable Development 11: 19-32.
9. ECN. 2015. database for biomass and waste. Available at: http://www.ecn.nl/phyllis2 Accessed 8 July 2015.
10. Fan, X., B. Chen, and X. Zhang. 2015. Field Survey on Indoor Air Pollution Transport Path in Rural House in Northeast China. Procedia Engineering 121: 430-437.
11. Febriansyah, H., A. A. Setiawan, K. Suryopratomo, and A. Setiawan. 2014. Gama Stove: Biomass Stove for Palm Kernel Shells in Indonesia. Energy Procedia 47: 123-132.
12. Grabow, K., D. Still, and S. Bentson. 2013. Test Kitchen studies of indoor air pollution from biomass cookstoves. Energy for Sustainable Development 17: 458-462.
13. Halder, P. K., N. Paul, and M. R. A. Beg. 2014. Assessment of biomass energy resources and related technologies practice in Bangladesh. Renewable and Sustainable Energy Reviews 39: 444-460.
14. Hankey, S., K. Sullivan, A. Kinnick, A. Koskey, K. Grande, J. H. Davidson, and J. D. Marshall. 2015. Using objective measures of stove use and indoor air quality to evaluate a cookstove intervention in rural Uganda. Energy for Sustainable Development 25: 67-74.
15. Johnson, M., R. Edwards, C. Alatorre Frenk, and O. Masera. 2008. In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households. Atmospheric Environment 42: 1206-1222.
16. Ashrafi, Kh., M. Shafie Pour Motlagh, M. S. Mousavi, M. H. Niksokhan, and H. R. Vosoughifar. 2016. Determining the Contribution of Gas Emissions from Cars and Estimating the Distribution of CO Emissions in Enclosed Parking 8: 10.
17. Kshirsagar, M. P., and V. R. Kalamkar. 2014. A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove design. Renewable and Sustainable Energy Reviews 30: 580-603.
18. Lertsatitthanakorn, C., J. Jamradloedluk, and M. Rungsiyopas. 2014. Study of Combined Rice Husk Gasifier Thermoelectric Generator. Energy Procedia 52: 159-166.
19. Mukunda, H., S. Dasappa, P. Paul, N. Rajan, M. Yagnaraman, D. Ravi Kumar, and M. Deogaonkar. 2010. Gasifier stoves–science, technology and field outreach. Current Science 98: 627-638.
20. O'Shaughnessy, S. M., M. J. Deasy, J. V. Doyle, and A. J. Robinson. 2014. Field trial testing of an electricity-producing portable biomass cooking stove in rural Malawi. Energy for Sustainable Development 20: 1-10.
21. Ochieng, C. A., C. Tonne, and S. Vardoulakis. 2013. A comparison of fuel use between a low cost, improved wood stove and traditional three-stone stove in rural Kenya. Biomass and Bioenergy 58: 258-266.
22. Ostad-Hosseini, M., A. Ghazanfari Moghaddam, H. Hashmipor-rafsanjani, and A. Ataei. 2015. Investigating and modeling the pyrolysis kinetic of leaves and stems of pistachio trees for biofuel production. Journal of Agricultural Machinery 6 (2): 429-439. (In Farsi).
23. Panwar, N. L., S. Kothari, and S. C. Kaushik. 2013. Techno-economic evaluation of masonry type animal feed solar cooker in rural areas of an Indian state Rajasthan. Energy Policy 52: 583-586.
24. Parmigiani, S. P., F. Vitali, A. M. Lezzi, and M. Vaccari. 2014. Design and performance assessment of a rice husk fueled stove for household cooking in a typical sub-Saharan setting. Energy for Sustainable Development 23: 15-24.
25. Phusrimuang, J., and T. Wongwuttanasatian. 2016. Improvements on thermal efficiency of a biomass stove for a steaming process in Thailand. Applied Thermal Engineering.
26. Raman, P., J. Murali, D. Sakthivadivel, and V. S. Vigneswaran. 2013. Performance evaluation of three types of forced draft cook stoves using fuel wood and coconut shell. Biomass and Bioenergy 49: 333-340.
27. Reeda, T., E. Anselmoa, and K. Kircherc. 2000. Testing & Modeling the Wood-Gas Turbo Stove.
28. Shen, G. 2016. Changes from traditional solid fuels to clean household energies-Opportunities in emission reduction of primary PM2.5 from residential cookstoves in China. Biomass and Bioenergy 86:

28-35.
29. Singh, S., G. P. Gupta, B. Kumar, and U. C. Kulshrestha. 2014. Comparative study of indoor air pollution using traditional and improved cooking stoves in rural households of Northern India. Energy for Sustainable Development 19: 1-6.
30. Sutar, K. B., S. Kohli, M. R. Ravi, and A. Ray. 2015a. Biomass cookstoves: A review of technical aspects. Renewable and Sustainable Energy Reviews 41: 1128-1166.
31. Sutar, K. B., S. Kohli, M. R. Ravi, and A. Ray. 2015b. Biomass cookstoves: A review of technical aspects. Renewable and Sustainable Energy Reviews 41: 1128-1166.
32. Tryner, J., B. D. Willson, and A. J. Marchese. 2014. The effects of fuel type and stove design on emissions and efficiency of natural-draft semi-gasifier biomass cookstoves. Energy for Sustainable Development 23: 99-109.
33. Unknown. 2012. National ambient air quality standards (NAAQS). Available at: https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table. Accessed 11 August 2015.
34. Xiao, Q., E. Saikawa, R. J. Yokelson, P. Chen, C. Li, and S. Kang. 2015. Indoor air pollution from burning yak dung as a household fuel in Tibet. Atmospheric Environment 102: 406-412.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 1, Spring - Summer 2019, p. 209-220

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۸، ص ۲۲۰-۲۰۹

Fabrication and Evaluation of a Portable Biomass Stove for Implementing in Regions without Access to Natural Gas Distribution Network

M. A. Ebrahimi-Nik[1*]- A. Rohani[1]

Received: 07-08-2017
Accepted: 02-12-2017

Introduction

More than 40 percent of the world population is now dependent on biomass as their main source of energy for cooking. In Iran, the lack of access roads and inefficient transportation structure have made some societies to adopt biomass as the main energy source for cooking. In such societies, inefficient traditional three-wall cook stoves (TCS) are the sole method of cooking with biomass, which corresponds to the large fuel consumption and smoke emission. Biomass gasifier cook stoves have been on the focus of many studies as a solution for such regions. In these stoves, biomass is pyrolized with the supply of primary air. The pyrolysis vapors are then mixed with secondary air in a combustion chamber where a clean flame forms. In this study, a biomass cook stove was manufactured and its performance was evaluated feeding with three kind of biomass wastes (e.g. almond shell, wood chips, and corn cob).

Materials and Methods

A natural draft semi-gasifier stove was manufactured based on the stove proposed by (Anderson *et al.*, 2007). It had two concentric metal cylinders with two sets of primary and secondary air inlet holes. It had 305 mm height and 200 mm diameter. The stove was fed by wood chips, almond shell, and corn cob. Thermal performance of the stove was evaluated based on the standard for water boiling test. It consisted of three phases of cold start, hot start, and simmering. Time to boil, burning rate, and fire power was measured in minute. A “K” type thermocouple was used to measure the water temperature. Emission of carbon monoxide from the stove was measured in three situations (e.g. open area, kitchen without hood, and kitchen under hood) using CO meter (CO110, Thaiwan).

Results and Discussion

Neither particulate matter nor smoke was visually observed during the stove operation except at the final seconds when the stove was going to run out of fuel. The flame color was yellow and partly blue. The average time to boil was 15 min; not significantly longer than that of the LPG stove (13 min). Time to boil in hot phase was almost the same for all fuels which is not in line with the studies reported by (Kshirsagar and Kalamkar, 2014; Ochieng *et al.*, 2013; Parmigiani *et al.*, 2014). This is probably due to the stove body material. In fact, the hot phase test, aims to show the effect of the stove body temperature on the performance. In contrast with the most of the stoves, the one was used in the present study was made of a thin (0.3 mm) iron sheet which has a high heat transfer and low heat capacity. This results in a rapid increase in the stove body temperature up to its highest possible. The longest flaming duration (51 min) was observed by 350 g almond shell. Thermal efficiency on the other hand, was different in using different biomass fuels. The average thermal efficiency of 40.8 was achieved by the stove which is almost three times of open fire. The results from emission test showed that the average of carbon monoxide surrounding the operator in the case of open area, kitchen without hood, kitchen under hood, and traditional open fire were 4.7, 7.5, 5.2, and 430 ppm, respectively.

Conclusions

The amount of carbon monoxide emitted to the room is in accordance with the US National ambient air quality standards (NAAQS) hence, compared with traditional methods of cooking in deprived regions, the stove burns cleaner with higher efficiency. In order to prohibit respiratory decreases in housekeeping women, this stove could be disseminated in some deprived regions of Iran.

Keywords*:* Agricultural wastes, Pyrolysis, Stove, Thermal efficiency

---

1- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad and Research Center for Agricultural Machinery (RCAM), Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: ebrahimi-nik@um.ac.ir)